刘丽丽, 李英华, 王雪莲, 等. 2019. 基于观测系统模拟试验的海表气象观测站点布局方案研究 [J]. 气候与环境研究, 24(6): 711−722. LIU Lili, LI Yinghua, WANG Xuelian, et al. 2019. Study of Sea Surface Meteorological Observation Station Schemes Based on Observational System Simulation Experiments [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(6): 711−722. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18066

基于观测系统模拟试验的海表气象观测站点布局方案研究

刘丽丽[1, 2] 李英华[1] 王雪莲[1] 王炜[1] 吴彬贵[1] 邱晓滨[1, 2] 陈靖[1]

1 天津市气象科学研究所，天津 300074
2 天津市海洋气象重点实验室，天津 300074

摘 要 为了科学设计黄渤海海洋气象边界层观测站网并研究观测网布局对数值天气预报模式的影响，本文采用模式误差、海洋气象要素特征区域资料统计分析和观测系统模拟试验（OSSE）方法，根据边界层雾、层云降水、小风与中等风速天气条件设计布局方案，并分析站点观测要素对数值预报模式的要素预报的影响。模拟试验数据使用了每6 h NCEP再分析资料FNL（NCEP Final Operational Global Analysis data）、NCEP每天平均的高分辨率海温资料RTG_SST（Real-Time Global Sea Surface Temperature）和石油平台、浮标站等每小时实况观测资料，评估了黄渤海海洋气象站网布局各个方案的优缺点。评估结果表明，湿度和风的要素预报受实况风向风速条件影响，偏东和偏北风个例湿度要素预报较好。然而，在偏南中等风速个例中，风场预报要素更接近实况。温度场的分析综合结果显示，在海气相互作用影响较大的天气过程中，特征区域布站能明显提高温度要素的预报准确率。最后，综合分析多项模拟试验的结果，给出了改进数值预报准确率的海洋布站建议。

关键词 观测系统模拟试验 数值模拟 海洋气象 布局 天气预报
文章编号 1006-9585(2019)06-0711-12 **中图分类号** P411 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18066

Study of Sea Surface Meteorological Observation Station Schemes Based on Observational System Simulation Experiments

LIU Lili[1, 2], LI Yinghua[1], WANG Xuelian[1], Wang Wei[1], WU Bingui[1], QIU Xiaobin[1, 2], and CHEN Jing[1]

1 *Tianjin Institute of Meteorological Science*, *Tianjin* 300074
2 *Tianjin Key Laboratory of Marine Meteorology*, *Tianjin* 300074

Abstract This work aimed to design an observational network of the air−sea boundary layer over the Bohai and the Yellow Sea, China, and further investigate the effects of these observations on a U. S. numerical prediction model (Weather Research and Forecasting model, WRF). Statistical analysis of the regional characteristics of the air-sea elements, model error, and observation system simulation experiments (OSSE) were conducted. Evaluations of the observation network were conducted under different wind and weather conditions and the advantages and disadvantages of each configuration scheme were weighed. The 6-h NCEP/NCAR FNL (NCEP Final Operational Global) reanalysis data, NCEP real-time global daily sea surface temperature (RTG_SST) analysis data, and buoy and oil-platform

收稿日期 2018-05-15；**网络预出版日期** 2019-05-14
作者简介 刘丽丽，女，1983年出生，博士，主要从事中尺度气象和海气耦合方面研究，E-mail: lililiuwuwu@126.com
通讯作者 邱晓滨，E-mail: qiuxiaobin.tj@gmail.com
资助项目 国家自然科学基金项目41675018、41305088，天津市自然科学基金项目16JCYBJC21500、17JCQNJC08200
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41675018 and 41305088), Natural Science Foundation of Tianjin (Grants 16JCYBJC21500 and 17JCQNJC08200)

observational data were used. Results showed that the forecast humidity and wind were greatly affected by the actual direction and velocity of the wind, and humidity was better predicted under easterly and northerly wind conditions. Moreover, in the moderate southerly wind case, the forecast winds were closer to the observations. It was found that the forecast accuracy of temperature could be significantly improved by configuring the station network based on regional characteristics. Based on a comprehensive overview of the model simulations, suggestions for configuring the air-sea observation stations so as to improve numerical forecast accuracy are provided.

Keywords OSSE (Observation System Simulation Experiment), Numerical simulation, Ocean meteorology, Distribution, Weather forecast

1 引言

目前，人类对海洋环境参数的多尺度变化、海气相互作用、陆海相互作用、海洋气象灾害等问题还了解甚少。解决海洋科学问题和预报海洋气象灾害，均需要建立长期或阶段性的海洋气象观测网，这是整个预报研究系统的基础和前提。海洋气象观测网布局不仅需要针对研究海区的海洋气象特点，而且需要结合观测的目的和要求。只有合理布置观测站点，才能掌握研究海区的海洋气象的科学特征（郑沛楠等，2010）。

早在1946年，Drozdov and Shepelevskii（1946）开始了气象站布站设计研究，并且提出将结构函数作为台站网设计的设想。1982年，印度的Mooley and Mohamed（1982a，1982b）将雨量场的结构函数应用于热带地区气象站的布站。2004年，Schneebeli and Laternser（2004）则利用模糊数学及概率统计的数学方法，确定降雪量观测站的布站间距。1986～2000年，国内很多学者（崔伟强，1986；杨贤为和何素兰，1987；赵瑞霞等，2007）采用相关函数法、结构函数法、最优插值法分别对我国江淮平原、四川盆地等地区气象站的布站进行了一系列的合理布局研究。李妮娜和李建（2017）利用相关函数法研究中国西南复杂地形区的测站代表性问题。这些研究多以统计学方法为主，虽然它们可以确定布站位置和间距，但是未深入探讨站点布局是否影响天气预报效果的问题。

随着数值天气预报模拟技术的发展和完善，越来越多的研究人员使用数值模拟的方法进行站点布局研究。张朝林和王迎春（2002）用初始场扰动法分析风廓线仪布设对大气风场探测的影响。该方法适用于对观测变量敏感的短期天气过程，并可看出观测变量随预报时效增加的过程变化以及随时间增加的影响范围变化。近年来，基于伴随模式或者是基于集合的适应性观测试验方法研究气象观测站的设置是当前国际较流行的一种布站方法（雷荔傈和谈哲敏，2008；李玉焕等，2013）。该方法通过初始条件的不确定性和天气系统的流体动力学特征识别数值预报敏感区，进而在敏感区布站。史军强等（2018）利用集合卡曼滤波（EnKF）同化方法和海洋模式FVCOM（Finite-Volume, primitive equation Community Ocean Model）评估岸基高频地波雷达观测系统的影响。适应性观测方法（Majumdar et al.，2006），相对于平均插值法更加严谨，但容易因模态设计不合理导致敏感区虚假（张宇等，2012）。基于集合的适应性观测法还有流型依赖的特性，与业务资料同化系统常用的三维变分（3DVAR）方案存在不一致性，不同的同化方案会得到不同的分析误差。同时，由于滤波发散问题，分析点和观测点之间会存在虚假的相关等问题（田伟红和庄世宇，2007）。用适应性观测方法研究布站位置问题多集中于研究区域的上游，且不同气象要素的敏感区位置差异较大，不满足实际业务中固定区域多要素综合布站的需求。

黄渤海区域布设气象观测站的关键问题，就是根据海洋气象要素站稀少的特征，通过寻找敏感区科学地布设海洋气象要素站，构建能够反映海洋对数值天气预报模式的影响的新型海洋气象观测站网。为了突出在黄渤海区域观测资料稀少的条件下，模式初值场误差对数值模式预报结果的敏感性问题，本文重点考察初始场误差最大区域对模式预报结果的影响，未考虑同化方法对模式预报的不确定性的影响。

2 布站区域预选

研究过程首先开展了多年海洋气象观测资料的统计分析，然后使用WRF（Weather Research and Forecasting model）数值预报模式对黄渤海观测站

网布局方案进行观测系统模拟试验（OSSE），最后利用误差分析方法评估不同布站方案对数值天气预报的影响，确定影响敏感区域。由于海洋的季节性、大气的季节性月份以及不同海洋区域的季节性月份并不完全重合（乔方利，2012），为了同时考虑大气和海洋的季节性特征，清除黄渤海天气气候分型与海温分型差异造成的复杂影响，本文挑选了大气和海洋的季节性重合的月份作为代表月，即选取能保持两者分型一致的2月、5月、8月、11月份代表四季。然后，结合模式误差、海洋气象特征等分布特点，进行布站特征区域的预选。

2.1 资料和个例选取

模拟实例挑选2011～2012年渤海石油A平台（54646）观测到的晴天、多云天（总云量<5）以及小风（<3 m/s）个例。资料分析数据分别为NCEP再分析资料FNL（NCEP Final Operational Global Analysis data），分辨率1°（纬度）×1°（经度）；NCEP每天平均的RTG_SST高分辨率海温资料，分辨率0.5°（纬度）×0.5°（经度）；以及A平台和浮标站等实况观测资料。

2.2 基于支持向量机（SVM）算法的海洋气象要素特征区域预选

预选海洋气象要素特征区域是实现观测站网密度的最优化的重要步骤。气象要素特征区域预选方法可以采用基于交叉验证的支持向量机（SVM）算法。SVM的优势是可以利用非线性拟合技术做预测分析。支持向量机的基本思想是通过线性映射$\boldsymbol{\Phi}$将样本数据(x_i, y_i)，$x_i \in \mathbf{R}^n$, $y_i \in \mathbf{R}$, $i=1, ..., l$，映射到高维特征空间$\boldsymbol{F}$，并进行线性回归。即

$$f(x) = [\boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Phi}(x)] + b, \boldsymbol{\Phi}: \mathbf{R}^n \to \boldsymbol{F}, \boldsymbol{\omega} \in \boldsymbol{F}, \quad (1)$$

其中，$f(x)$是特征向量中的一个线性函数，$\boldsymbol{\omega}$是权重向量，b是阈值（范海娟，2013）。一般选用多年气象要素数据作为样本数据并且建立回归模型（唐慧强等，2013）。回归模型建立过程采用了S型核函数（Sigmoid核函数）、高斯径向基核函数、径向基函数等作为核函数来训练支持向量机。该方法可以利用核函数的非线性生成预测结果的误差增长。

站点预选过程是通过逐一删除网格内站点的气象要素数据的方法确定站点影响区域。即利用其他站点的气象数据进行回归预测生成该站点的观测值，然后比较该站点原来的数值与回归预测的数值间误差，舍去预测结果中误差较小的站点。因为误差小的站点气象数据可以用其他站点的气象数据通过回归方法获取，从而实现站网密度的优化。本文样本数据为黄渤海区域57个基本观测站和9个浮标站的温度日均值，总样本数为45184个，训练样本数为30124个，验证样本数为15060个。SVM对温度的拟合训练为非线性训练，精度达到拟合数据的0.1°。训练结果表明，在温度要素等值线密集区需要更多的布站。在长江中下游、华北和东北三大平原地区的温度、湿度和降水量观测合理布局研究中，有学者（范海娟，2013； 唐惠强等，2013）运用支持向量机算法证明了在温度/湿度等值线密集区增加布站个数，在等值线稀疏区可适度减少布站个数。结合SVM计算结果和前人的研究成果本文在温度、湿度要素差异大的地区即气象特征区域应增设站点。

基于已有文献的研究结论并且根据海洋四季代表月的海洋区域环流特征（乔方利，2012），海洋特征区域确定为渤海月平均海温梯度大值区。多篇文献（刘书明，2010；王斌，2005；钱粉兰等，2002；宋丹等，2010；徐蜜蜜等，2010）阐述了黄渤海地区多年温度湿度等要素特征，且给出了用平均温度密集区代表的海洋气象特征区。这个海洋气象特征区同本项研究的模式特征区域重合，因此本研究中用模式特征区涵盖海洋气象特征区域（图1）。

2.3 基于误差分析的模式特征区域预选

为了预选数值模式中与海洋相关初始场的特征区域，需要分析模式初始场的海温要素误差。预选工作首先将选定个例的FNL再分析数据生成数值天气预报模式初始场中的海温数据，然后再计算其同RTG_SST高分辨率海温资料的月平均误差，得到黄渤海区域的海温误差分布特征（图1）。误差分布总体特征是渤海3个内湾（渤海湾、辽东湾、莱州湾）以及黄渤海沿岸区域误差等值线相对密集，而在黄渤海中部误差等值线稀疏且趋近于0。代表月份的误差特征分别表现出如下特点，2月黄渤海沿岸误差分布以正为主，黄海暖舌区域误差为负；5月黄渤海沿岸误差分布以负为主，黄海暖舌区域误差范围比2月减小；8月整个渤海区域误差不是很大；11月黄渤海沿岸误差分布又转为以正为主，黄海暖舌区域误差分布同2月类似。黄渤海沿岸误差随季节变化呈现“正—负—正”的特征，黄海暖舌的北侵和南退也使所在区域的误差变化呈现明显的季节性特征。根据误差的空间分布特征，确定误差绝对值的大值区为模式特征区域。

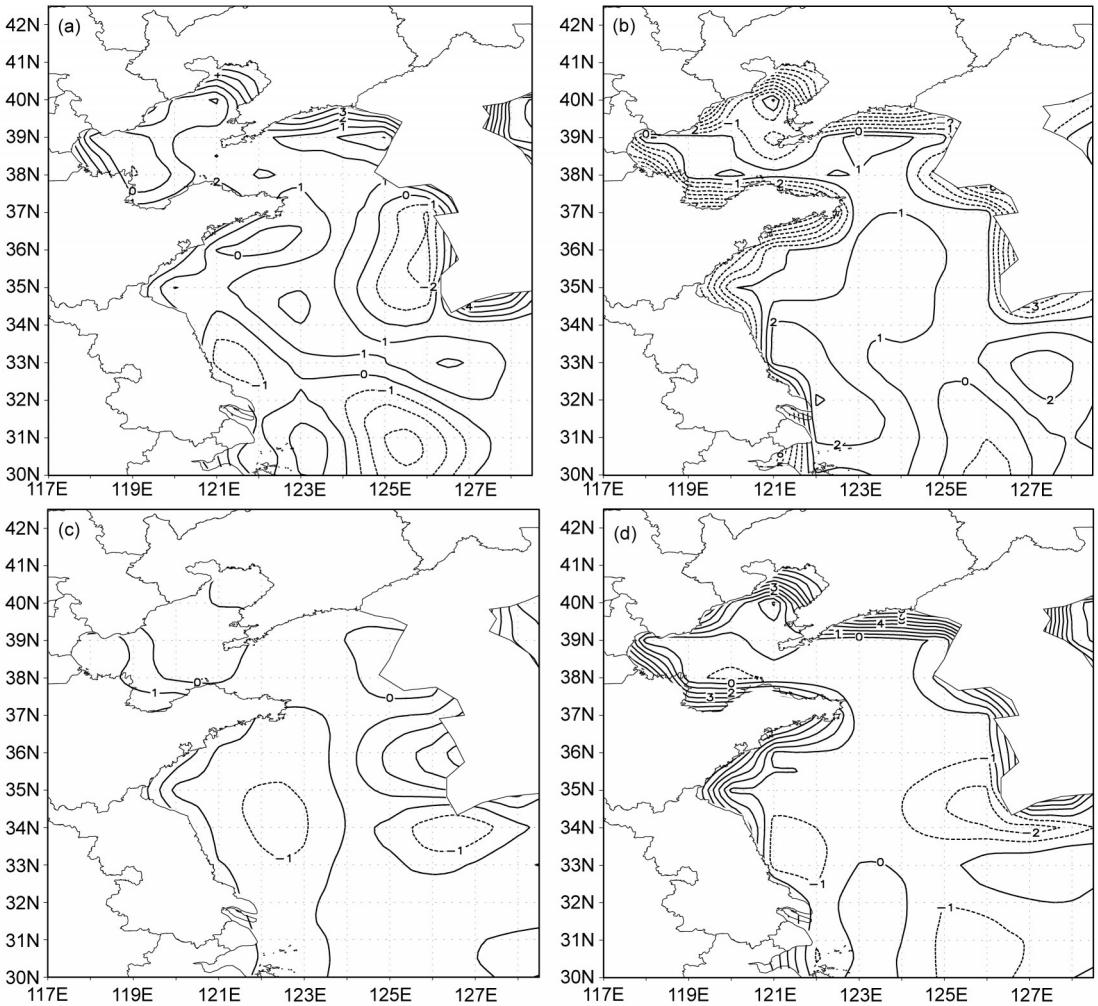

图1 黄渤海四季代表月模式初始场海表温度月平均误差（单位：K）：（a）2月；（b）5月；（c）8月；（d）11月

Fig. 1 Monthly mean sea surface temperature errors (K) of the model initial field in Yellow Sea and Bohai Sea: (a) February; (b) May; (c) August; (d) November

3 站点布局数值模拟试验方法

3.1 OSSE试验设计

拟预选区域确定后，需要进行观测网数值模拟试验方案设计。目前，观测网的科学规划常采用观测系统模拟试验（OSSE）方法，它是评估观测系统配置是否合理和分析模拟观测资料效果的一种有效方式（Arnold and Dey，1986）。这种方法先选择一定设置下的数值模式预报的格点资料作为“真实大气”（Nature Run）或称为“参考大气”，并从该“真实大气”中提取模拟观测资料。然后，在一个不同设置下的模式中同化该模拟观测资料，并评估加入模拟观测资料的预报与“真实大气”预报的拟合程度，以此分析观测系统的观测资料对数值模式预报效果的影响（李玉焕等，2013）。这种观测站网的科学布置能够有效提高数值预报的准确率（张朝林和王迎春，2002）。

依据OSSE的原理，试验方案根据黄渤海区域的布站区和非布站区的海洋气象观测资料的特点，设计了3个试验方案：

（1）控制试验方案（Control Run）。只用NCEP的FNL再分析数据进行数值模拟。

（2）真实试验方案（Nature Run）。本方案采用FNL再分析资料和实况观测数据。试验步骤是利用WRF模式的OBSGRIB模块，在再分析资料中加入A平台资料和实况观测浮标站资料（图2），然后进行数值模拟试验。

（3）敏感性试验方案。为了避免同化过程造成的分析误差改变，本试验从真实试验场中提取假定站点的观测值并转成模式所需的观测数据格式

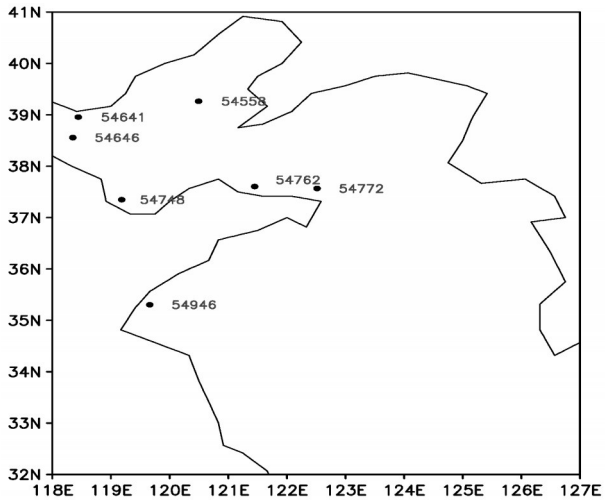

图2　实况观测浮标站和A平台（54646）位置示意图

Fig. 2　Schematic diagram of buoy stations and A (54646) oil-platform

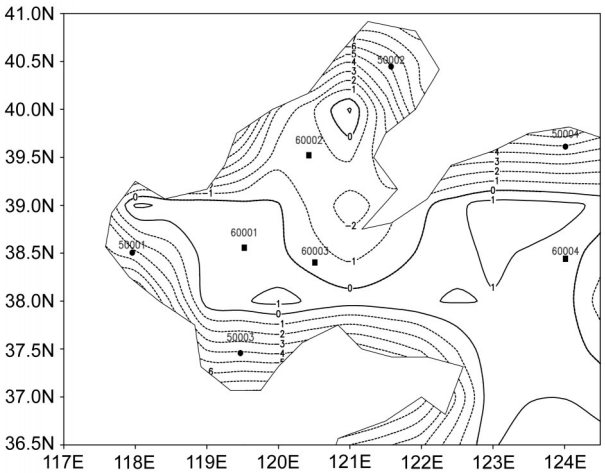

图3　OSSE敏感性试验站点布局，等值线为5月初始场海表温度月平均误差（单位：K）

Fig. 3　Stations distribution of OSSE (Observation System Simulation Experiment) sensitive experiments. The isolines indicate the monthly mean sea surface temperature errors (K) of the initial field in May

（little_r），通过OBSGRIB模块直接插值进初始场，进行敏感性试验。图3给出了敏感性试验的假定站点区域分布。试验中将特征区域布站设定为方案1（EXP1），将非特征区域布站设定为方案2（EXP2）。表1给出了EXP1和EXP2站点分布位置及假定编号。 EXP1和EXP2中设置的站点同图3中的站点相互对应，设定EXP1和EXP2站点之间间距约为150 km。原则上，两种布站方案的模拟试验选取相同的天气系统，避免天气系统不同而造成的模拟误差。

表1　试验方案站点设计

Table 1　Design scheme for site distribution experiment

试验方案	站点编号	纬度	经度
EXP1	50001	38.5°N	118°E
	50002	40.5°N	121.8°E
	50003	37.5°N	119.5°E
	50004	39.3°N	124°E
EXP2	60001	38.5°N	119.5°E
	60002	39.5°N	120.5°E
	60003	38.5°N	120.5°E
	60004	38.5°N	124°E

3.2　模拟试验的检验方法

（1）区域平均误差。目标时刻内（如24 h）某变量在目标区域的平均误差。$M_{E1}=M_1-M_o$ $M_{E2}=M_2-M_o$，M_o为真实试验中某气象要素区域平均值，M_1为敏感性试验EXP1中某气象要素区域平均值，M_2为敏感性试验EXP2中某气象要素区域平均值。M_{E1}为敏感性试验EXP1中某气象要素区域平均误差，M_{E2}为敏感性试验EXP2中某气象要素区域平均误差。该检验方法体现了布站方案对目标区域数值预报的影响。

（2）偏差百分比：

$$B_{ias}=\left(\left|\frac{M_1-M_o}{M_o}\right|-\left|\frac{M_2-M_o}{M_o}\right|\right)\times 100\%,\quad (2)$$

B_{ias}为偏差百分比，偏差百分比可以从数据正负值上明显看出哪种布站方案的要素模拟更接近真实试验结果。

模拟结果将利用两种检验方法分析EXP1和EXP2方案布站对数值天气预报效果的影响。

4　试验结果分析

4.1　模拟试验的个例选择

模拟试验选取包括海雾、层云降水以及晴空条件下不同风向和风速的天气实例，表2给出了模拟试验选取实例的详细信息。试验过程分成敏感性试验与真实试验两步，重点分析2 m温度、10 m风速、10 m风向、2 m相对湿度的区域平均误差和区域偏差百分比，并且分别评估布站区（EXP1）和非布站区（EXP2）方案预报效果。评估区域设为渤海及沿岸周边区域（32°N～41°N，118°E～127°E），即图2所示范围。

表 2 天气概况及真实试验浮标站信息

Table 2 Information of weather and nature run buoy stations

	天气现象	预报时效	A平台风向和风速	起报时间(协调世界时)	真实试验选取浮标站
个例1	海雾,能见度100 m	0～15 h 16～24 h	南—东东南风,1.6～3.0 m/s 南东南风,6.0～8.1 m/s	2011年2月20日18:00	54646、54558、54641、54772、58573
个例2	层云降水,A平台小雨,陆地站大雾	0～24 h	北—东东北风,5.1～9.5 m/s	2011年12月6日18:00	54646、54558、54641、54762、54772、54946、58573
个例3	晴空	0～7 h 8～18 h 19～24 h	南东南—南西南风,4.0～7.0 m/s 西西北—东北风,2.5～8.7 m/s 东南风,5.6～7 m/s	2011年5月6日12:00	54646、54558、54641、54772、54946、58573
个例4	陆地大雾,海上轻雾	0～20 h 21～24 h	东南—南风,4.3～8.0 m/s 北风,5.6～7.7 m/s	2012年10月25日18:00	54646、54558、54748、54762、54772、54946、58573

4.2 不同试验方案下试验模拟结果的区域平均误差分析

4.2.1 海雾天气条件下模拟试验的区域平均误差

个例1是一次能见度100 m的海上大范围海雾过程，在前15 h，A平台观测为2 m/s左右的偏东小风，16～24 h，风向转为偏南风，风速加大为6 m/s以上的中等风速。

因为模拟试验的前3 h为模式调整期，模拟结果不稳定，所以以下分析过程将不考虑模式前3 h的模拟数据。由图4的OSSE试验结果可见，特征区方案EXP1的前14 h内，温度、相对湿度和风向要素模拟效果总体好于初始误差值小的非特征区方案EXP2；但14 h后，两个特征区的模拟误差迅速减小，甚至出现EXP1模拟效果略次于EXP2模拟效果的现象，尤其2 m相对湿度模拟结果中这种现象更加明显。然而，10 m风速的模拟结果表明在整个模拟过程中EXP2的10 m风速模拟结果更接近实况。2011年2月21日08:00（模拟时长16 h），A平台实况观测到风速由2～3 m/s转为6 m/s，风向由东东南转为东南，风向更为偏南，其余浮标站实况也由偏北风转为偏南风。通过对A平台实况观测资料和天气形势分析，初步判定是模拟14 h后，天气形势逐渐变化导致的风向风速转换而引起的两个试验方案与实况误差大小的转变。在小风速和风向偏东（北）的情况下，在特征区域布站的模拟结果更优。但是，在雾天中布站特征区域的温度和湿度要素误差随风向转换（转偏南风）和风速增大（2～3 m/s转为6 m/s）而增大，因此，布站方案对不同天气形势的响应需分类研究。为了证实以上结论，本文进一步探讨不同天气条件下布站方案对数值预报模拟结果的影响。

4.2.2 层云降水天气条件下模拟试验的区域平均误差

本节分析弱冷锋导致的层云降水天气过程，陆地大雾，海上为小雨。A平台观测本次过程为中等风速，风向偏北。在整个模拟过程中，布站特征区域的温度和湿度明显更接近实况，两种方案的风场误差相近（图5）。但从误差量级来看，本实例的特征区域站点要素对模式风、温、湿的影响显然小于海雾个例。尽管不同布站方案对该次过程温度和风场气象要素的影响较低，但是湿度要素还是表现出不同的特点。在真实试验中，因为浮标站没有湿度要素，所以只使用了A平台（54646）的湿度相关数据（即露点温度）。虽然湿度观测资料加入较少，特征区域和非特征区域的湿度的误差变化仍然最大。这表明湿度对布站位置敏感，建议海洋建站中加强大气湿度的观测。

4.2.3 晴空条件下的中等风速（>6 m/s）模拟试验的区域平均误差

在海雾模拟试验中，特征区域和非特征区对风速的敏感性截然不同。在渤海层云降水模拟中，特征区和非特征区对风速和风向的模拟效果影响不显著。那么，敏感性试验结果是否跟边界层的风场有关？为了验证这一问题，挑选1个风速大于6 m/s并且观测主风向为北—东北的晴空个例进行OSSE试验并检验。

这次天气过程的模拟试验结果表明（图6），在3～17 h的模拟期间，大部分时间的风速大于6 m/s，同时特征区域布站的预报效果优于非特征区布站方案的预报效果。18 h后，两种方案中风场要

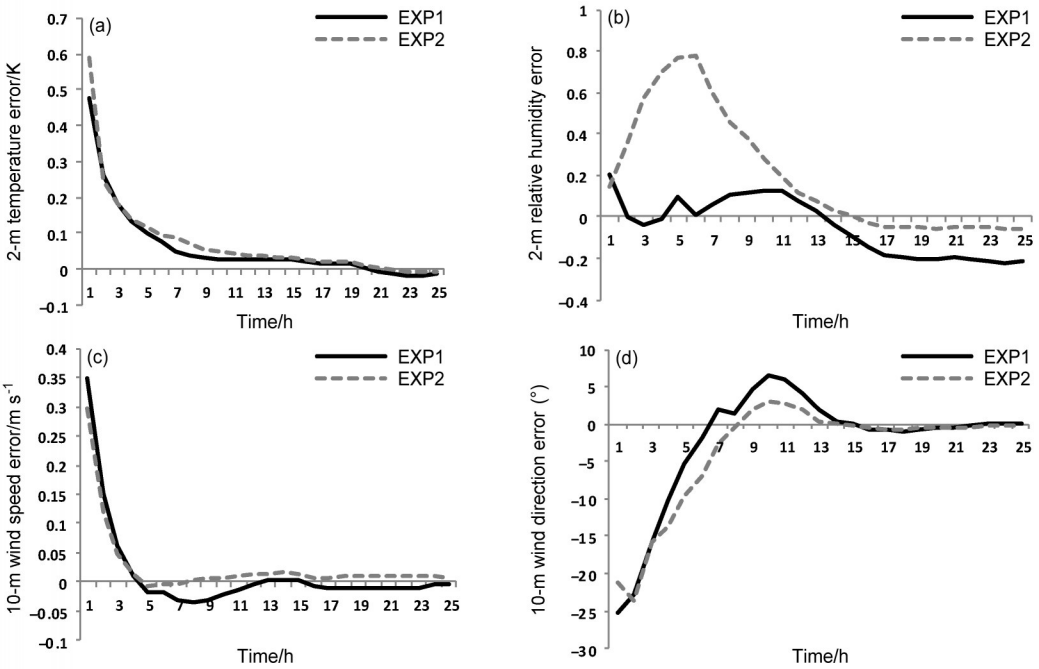

图4　个例1中敏感性试验方案EXP1和EXP2各气象要素区域平均误差：（a）2 m温度；（b）2 m相对湿度；（c）10 m风速；（d）10 m风向

Fig. 4　Area average error of meteorological elements in EXP1 (experiment 1) and EXP2 in case 1: (a) 2-m temperature; (b) 2-m relative humidity; (c) 10-m wind speed; (d) 10-m wind direction

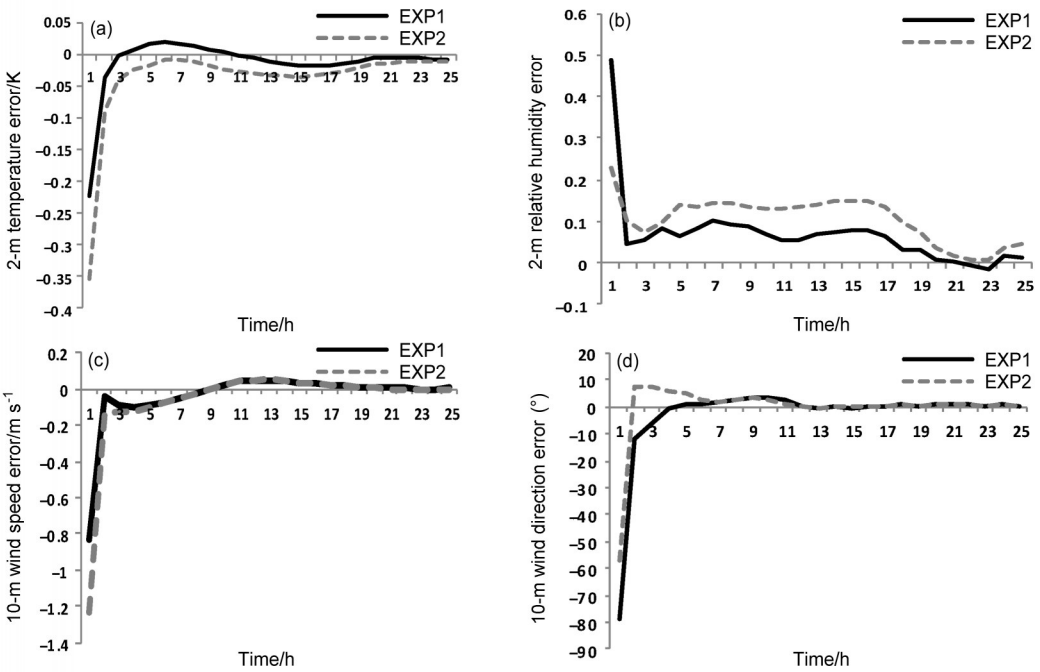

图5　个例2中敏感性试验方案EXP1和EXP2各气象要素区域平均误差：（a）2 m温度；（b）2 m相对湿度；（c）10 m风速；（d）10 m风向

Fig. 5　Area average error of meteorological elements in EXP1 and EXP2 in case 2: (a) 2-m temperature; (b) 2-m relative humidity; (c) 10-m wind speed; (d) 10-m wind direction

素误差逐渐接近,但是特征区域布站方案中温度和湿度的误差比非特征区方案略偏大。在19 h模拟时刻，A平台实况观测到风向由偏东北风转为偏东南风，该个例也表现出EXP1误差增大时伴随着实况风向转南的特征。

在晴空条件的中等风速天气条件下，两种布站

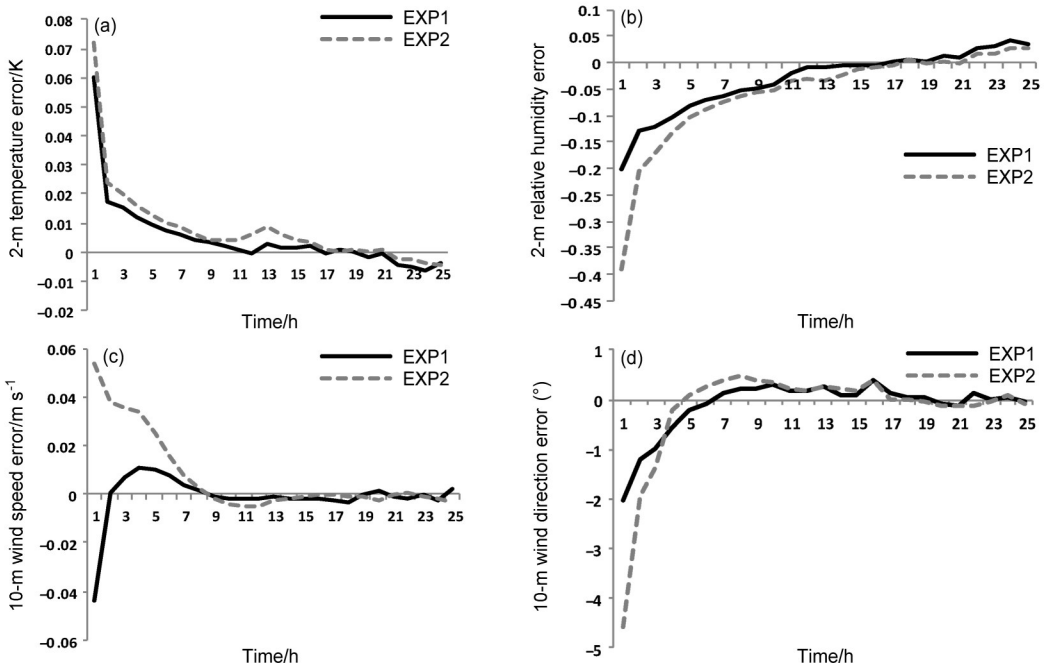

图6 个例3中敏感性试验方案EXP1和EXP2各气象要素区域平均误差：（a）2 m温度；（b）2 m相对湿度；（c）10 m风速；（d）10 m风向

Fig. 6 Area average error of meteorological elements in EXP1 and EXP2 in case 3: (a) 2-m temperature; (b) 2-m relative humidity; (c) 10-m wind speed; (d) 10-m wind direction

方案对近地面气象要素的预报效果影响不如在海雾和层云降水条件下显著。总体来看，小风条件下的特征区域布站对预报效果的影响较为明显。

4.2.4 偏南风天气条件下的模拟试验的区域平均误差

在海雾和晴空中等风速模拟试验结果均显示建站方案的预报效果可能受风向的影响。但是，考察的天气过程主风向为偏东风和偏北风情况，当风向转南时，湿度和温度要素的误差会相反变化。为了解决南风条件下湿度和温度要素误差变化的不确定性问题，这次试验样本选择了2012年10月26日东路弱冷锋导致的天津大面积陆地雾且A平台海上有轻雾的天气过程。在该天气过程中，A平台和浮标站风速约5 m/s、主导风向为南东南和东南。

本次过程区域平均误差结果显示（图7），在特征区域布站，温度的模拟结果变化比较复杂。7 h前，特征区域布站的温度误差比非特征区域布站的温度误差偏大；8～20 h，特征区域布站的温度误差比非特征区域布站的温度误差小；21 h后，特征区域布站的温度误差又转为偏大。

特征区域布站的风速误差在20 h前比非特征区域布站的风速误差偏小，21 h后，特征区域布站的风速误差也转大。但是，两种布站方案对风向误差影响不明显。风向风速分析表明，21h的A平台实况观测风向从南转北的转折点，这进一步验证了建站方案对模式的风向预报有影响。2 m相对湿度而言，20 h前特征区域布站的相对湿度误差更大；21 h后，特征区域布站的误差趋于减小。

4.3 偏差百分比分析

在表3中，气象要素的偏差百分比为负数表示建站方案的模拟效果更接近实况。偏差百分比可以看出，在多种天气类型下，特征区域布站的2 m温度的预报效果均有明显提高。然而，建站布局对10 m风场和2 m相对湿度场预报效果影响，则受风向风速的影响较大。在偏北或偏东风天气条件下，相对湿度的预报效果更接近实况；而在偏南风和中风风速的天气条件下，风场的预报会更好些。

在真实模拟试验中，站点布局在海雾和层云降水条件的模拟效果改进比晴空条件下改进较大.根据海气特征区以及误差特征区分析以及OSSE试验结果研究，在海气边界层设置观测站应遵循沿岸密深海疏，北部密南部疏并增加湿度观测的布站原则。

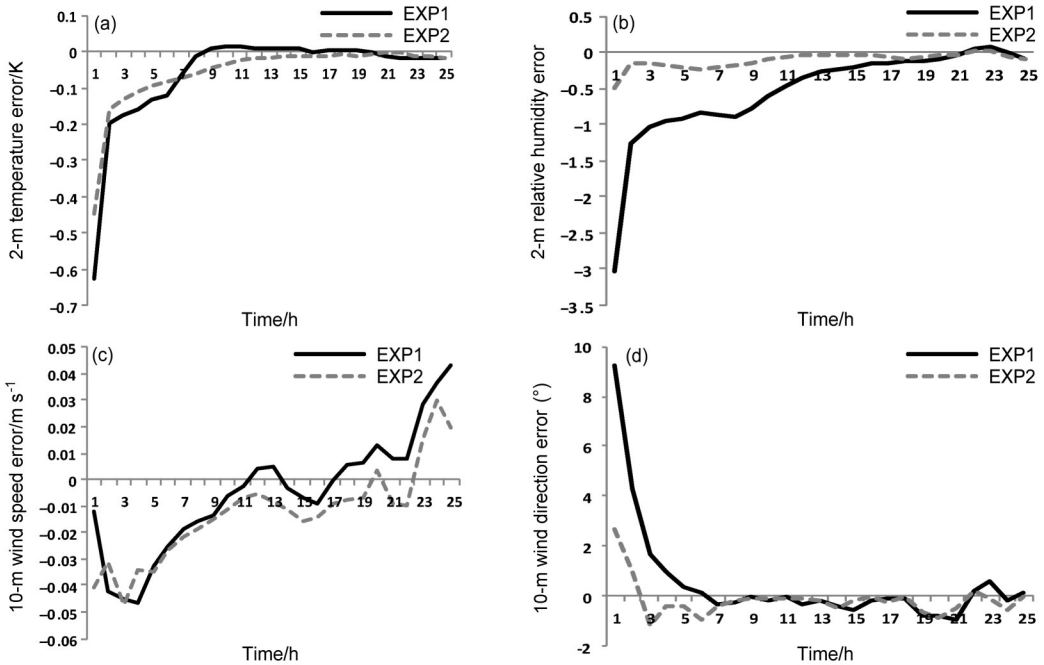

图7　个例4中敏感性试验方案EXP1和EXP2各气象要素区域平均误差：（a）2 m温度；（b）2 m相对湿度；（c）10 m风速；（d）10 m风向

Fig. 7　Area average error of meteorological elements in EXP1 and EXP2 in case 4: (a) 2-m temperature; (b) 2-m relative humidity; (c) 10-m wind speed; (d) 10-m wind direction

表3　不同个例偏差百分比数据示范

Table 3　Percentage deviations from the mean of various elements for different weather cases

起报时间	预报时效	2 m温度偏差百分比	2 m相对湿度偏差百分比	10 m风场偏差百分比	10 m风向偏差百分比
2011年2月20日18:00(海雾)	3～15 h	−0.0067%	−0.32%	0.25%	0.69%
	16～24 h	0.0002%	0.21%	0.015%	−0.025%
2011年12月6日18:00(层云降水)	3～24 h	−0.0037%	−0.06%	0.032%	0.055%
2011年5月6日12:00(晴空)	3～24 h	−0.00047%	−0.0059%	−0.027%	−0.033%
2012年10月25日18:00(海雾，偏南风)	3～20 h	−0.0034%	0.42%	−0.07%	−0.02%
	21～24 h	0.0028%	0.01%	0.07%	0.08%

5　黄渤海区域布站建议与观测站点选址

海洋气象站的建设在考虑布站的科学性基础上，还要考虑设备的承载环境以及供电等基础设施条件。由于黄渤海现有100多个石油平台，天津市气象局按该方案预选了海洋气象站站点布设位置，并新建了15个渤海石油平台观测站。

依据误差大值区布站原则，以及海气相关变量在渤海沿岸至渤海中部的观测误差梯度情况，挑选了渤海中部至辽东湾一线的6个石油平台站（锦州9-3西北、锦州20-2中北、锦州23-1、金县1-1A、旅大10-1、旅大32-2）以及莱州湾的一个石油平台站KL10-1CEP、渤海湾一个石油平台站渤中13-1；在渤海沿岸的误差等值线密集区加密挑选了秦皇岛32-6世纪号、QHD33-1WHP、渤中3-2；其余站点则依照布站均匀性进行布设。

在渤海海洋气象观测网建成后，将对实测资料采用同化的方法更深入得研究布站对短期天气过程的影响及模式对布站方案下资料的响应情况，以期将实测资料对数值预报的影响进行更全面的评价。

6　结论与讨论

为了解决黄渤海海洋气象观测网的科学布局问题，本文采用资料分析、布站预选和OSSE试验等方法开展了观测网布局的模拟研究，并且分析了黄

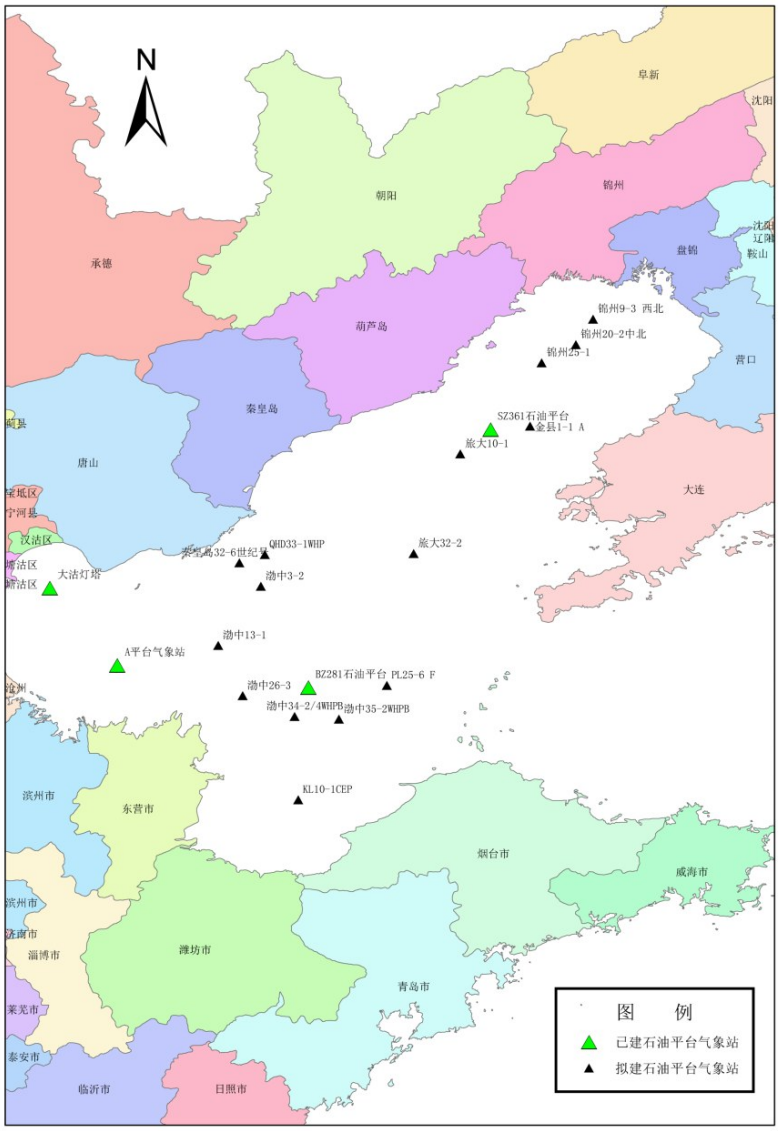

图8 渤海湾海洋气象业务站点选址设计图

Fig. 8 Design of ocean-meteorological observation service station site in Bohai Bay

渤海不同建站方案在边界层雾、层云降水、小风与中等风速天气条件下的风、温、湿预报要素的误差，从而确定了海洋气象观测站的布局位置。

在海洋气象观测站布局位置确定中遵循了下面的研究结论：

在特征区域布站，在海雾和层云降水天气过程中，气象要素预报效果改进明显，晴空天气条件下气象要素的预报效果改进较少。但是，此种布站中，不同的天气类型的温度预报结果均有改善。

不同布站方案的模拟试验结果都表现出湿度场的预报结果受初始场风向的影响较大。在偏东和偏北风的天气过程中，特征区域布站使湿度要素预报结果更接近实况；而在偏南风实例中，非特征区域布站的湿度要素预报效果更好。

不同建站方案对风场的模拟结果受实况风速和风向的共同影响。在偏东或偏北的试验中，特征区域布站使风场模拟效果略差；在偏东或偏北的中等风速实例中，特征区和非特征区布站对风场的模拟效果差别不大；在偏南的中风实例中，特征区域布站的风场模拟更接近实况。

海洋气象观测网的科学布站有利于海洋区域模式预报结果改善。但是，黄渤海区域不同建站方案

对模式预报结果的影响甚为复杂，不同布局方案的预报结果与不同风向、风速条件或不同天气类型有复杂的相关性。本次研究中给出的渤海沿岸的特征区域海洋石油平台布站，未能很好反映出渤海海峡和山东半岛等地形要素对天气过程的影响，忽略了渤海南部天气和海洋的来流信息，会导致偏南风的天气过程中温度和湿度预报效果偏差。

本文基于季节性误差分析，选取了更符合季节性特征的中小风速天气实例，但是，大风天气的风速较大，样本数据相对较少，统计的误差值较大，会影响非大风日的气象要素的观测误差值，所以忽略了极端大风情况下观测站对数值预报的影响；为了突出模式初值中的资料误差问题，未考虑同化技术对布站范围的初始值调整影响模式误差增长的问题。虽然省略了同化技术对误差分析的影响，但是今后还需进一步讨论观测的误差、密度以及模式的不确定性等对布站有效性及预报效果的影响。

参考文献（References）

Arnold C P, Dey C H. 1986. Observing-systems simulation experiments: Past, present, and future[J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 67(6): 687−695. doi:10.1175/1520-0477(1986)067<0687:ossepp>2.0.co;2

崔伟强. 1986. 珠江三角洲平原地区气候、雨量站网最佳密度的探讨[J]. 热带气象学报, (3): 268−274. Cui Weiqiang. 1986. The study of optimum density of climate and rainfall station networks over Zhujiang Plain area[J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), (3): 268−274.

Drozdov O A, Shepelevskii A A. 1946. The theory of interpolation in a stochastic field of meteorological elements and its application to meteorological elements and its application to meteorological map and network rationalization problems[J]. Trudy Niu Gugms Series1, No.13.

范海娟. 2013. 自动气象站布局密度优化的研究[D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 78pp. Fan Haijuan. 2013. Research on the density optimization of automatic weather station. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology, 78pp.

雷荔傈, 谈哲敏. 2008. 适应性观测及其策略问题[J]. 气象科学, 28(1): 109−118. Lei Lili, Tan Zhemin. 2008. On adaptive observation and adsptive observation strategies[J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 28(1): 109−118. doi: 10.3969/j. issn. 1009-0827.2008.01.019

李妮娜, 李建. 2017. 中国西南复杂地形区降水观测年际变化代表性问题初步分析[J]. 高原气象, 36(1): 119−128. Li Nina, Li Jian. 2017. Preliminary analysis of representativeness of precipitati-on observation over Southwest China[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 36(1): 119−128. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00008

李玉焕, 张朝林, 仲跻芹, 等. 2013. 北京地区暴雨个例的观测敏感区研究[J]. 气候与环境研究, 18(5): 651−661. Li Yuhuan, Zhang Chaolin, Zhong Jiqin, et al. 2013. Case study of observations and sensitive region of heavy rainfall in Beijing area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18(5): 651−661. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12020

刘书明. 2010. 利用卫星SAR图像研究黄渤海大气边界层波动[D]. 国家海洋局第一海洋研究所硕士学位论文: 103pp. Liu Shuming. 2010. A study of atmospheric boundary layer waves over the Yellow Sea and the Bohai Sea using satellite SAR images[D]. M. S. thesis (in Chinese), The First Institute of Oceanography, State Oceanic Adiministration, 103pp.

Majumdar S J, Aberson S D, Bishop C H, et al. 2006. A comparison of adaptive observing guidance for Atlantic tropical cyclones[J]. Monthly Weather Review, 134(9): 2354−2360, 2363, 2365−2372. doi:10.1175/mwr3193.1

Mooley D A, Mohamed Ismail P M. 1982a. Structure function rainfall field and their application to network design the tropics[J]. Archives for Meteorology, Geophysics and Bioclimatology Series B, 30(1−2): 95−105. doi:10.1007/BF02323397

Mooley D A, Mohamed Ismail P M. 1982b. Correlation functions of rainfall field and their application in network design in the tropics[J]. Pure and Applied Geophysics, 120(2): 249−260. doi: 10.1007/bf00877035

钱粉兰, 周明煜, 李诗明等. 2002. 黄海、东海海域出海气旋发展过程的气象场特征和热通量的观测研究[J]. 海洋学报, 24(增1): 77−83. Qian Fenlan, Zhou Mingyu, Li Shiming, et al. 2002. Observational study on the meteorological characteristics of the cyclone developing processes over the Huanghai Sea and the East China Sea area[J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 24(Supp. 1: 77−83.

乔方利. 2012. 中国区域海洋学—物理海洋学[M]. 北京：海洋出版社, 481pp. Qiao Fangli. 2012. Regional Oceanography of China Seas-Physical Oceanography (in Chinese) [M]. Beijing: China Ocean Press, 481pp.

Schneebeli M, Laternser M. 2004. A probabilistic model to evaluate the optimal density of stations measuring snowfall[J]. Journal of Applied Meteorology, 43(5): 711−719. doi:10.1175/2101.1

史军强, 尹训强, 乔方利. 2018. 利用资料同化方法优化观测系统的空间布局:以泰国湾为例[J]. 海洋学报, 40(2): 14−29. Shi Junqiang, Yin Xunqiang, Qiao Fangli. 2018. Optimizing the spatial ocean observation system based on data assimilation assessment: The Gulf of Thailand as an example[J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 40(2): 14−29. doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.02.002

宋丹, Thomas Pohlmann , 陈学恩. 2010. 原始热通量资料的海陆分布对近海SST模拟的影响[J]. 中国海洋大学学报, 40(7): 24−28. Song Dan, Thomas Pohlmann , Chen Xueen. 2010. Effects of air and sea distributions of the original heat flux dataset on simulating sea surface temperature in coastal seas[J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 40(7): 24−28. doi: 10.3969/j. issn.

1672-5174.2010.07.004

唐慧强, 范海娟, 丁琴. 2013. 长江中下游平原地区气温观测合理布局研究[J]. 科学技术与工程, 13(14): 4050−4056. Tang Huiqiang, Fan Haijuan, Ding Qin. 2013. The ideal density and distribution of automatic weather station climate observation over China's Yangzi Plain[J]. Science Technology and Engineering (in Chinese), 13(14): 4050−4056. doi:10.3969/j.issn.1671-1815.2013.14.045

田伟红, 庄世宇. 2007. 适应性观测与集合变换卡尔曼滤波方法介绍[J]. 热带海洋学报, 23（2）: 201−204. Tian Weihong, Zhuang Shiyu. 2007. The adaptive observation and the ensemble transform Kalman filter[J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (2): 201−204. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2007.02.014

王斌. 2005. 黄渤海海洋水文气象环境极值分布特征研究[D]. 中国海洋大学硕士学位论文: 51pp. Wang Bin. 2005. The distribution of annual extreme value over the Yellow Sea and the Bohai Sea[D]. M. S. thesis (in Chinese), Ocean University of China, 51pp.

徐蜜蜜, 徐海明, 朱素行. 2010. 春季我国东部海洋温度锋区对大气的强迫作用及其机制研究[J]. 大气科学, 3(6): 1071−1087. Xu Mimi, Xu Haiming, Zhu Suxing. 2010. Ocean-to-atmosphere forcing in the vicinity of the sea surface temperature front in East China Sea during spring time and its possible mechanisms[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 3(6): 1071−1087. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.06.04

杨贤为, 何素兰. 1987. 江淮平原二类气象站网的设计[J]. 气象学报, 45(1): 104−110. Yang Xianwei, He Sulan. 1987. The planning of the second group meteorological networks over Jianghuai Plain[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 45(1): 104−110. doi: 10.11676/qxxb1987.013

张朝林, 王迎春. 2002. 北京地区风廓线仪布网方案的数值研究[J]. 气象学报, 60(6): 786−791. Zhang Chaolin, Wang Yingchun. 2002. Numerical study on weather influences of location design of wind-profiler network for Beijing area[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60(6): 786−791. doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2002.06.018

张宇, 陈德辉, 薛纪善. 2012. 湿度因子对适应性观测敏感区估算的影响研究[J]. 气象学报, 70(1): 91−100. Zhang Yu , Chen Dehui, Xue Jishan, Ma Xulin. 2012. Study of the influence of the humidity factor on estimation in the adaptive observation sensitive region[J]. Acta Meteorologica Sinica(in Chinese), 70(1): 91−100. doi:10.11676/qxxb2012.008

赵瑞霞, 李伟, 王玉彬, 等. 2007. 空间结构函数在北京地区气象观测站网设计中的应用[J]. 应用气象学报, 18(1): 94−101. Zhao Ruixia, Li Wei, Wang Yubin, et al. 2007. The application of spatial structure functions to the design of weather station networks in Beijing area[J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 18(1): 94−101. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2007.01.013

郑沛楠, 姚志刚, 李晓婷, 等. 2010. 美国卡罗莱纳州区域海洋观测预报系统简介[J]. 海洋学研究，28(1): 88−96. Zheng Peinan, Yao Zhigang, Li Xiaoting, et al. 2010. Introduction on the coastal ocean observation and prediction system in Carilina, USA[J]. Journal of Marine Sciences (in Chinese), 28(1): 88−96. doi:10.3969/j.issn.1001-909X.2010.01.012